先端産業創造プロジェクト

第4回　「ナノカーボン」

ぶぎん地域経済研究所 調査事業部 次長兼主任研究員　**藤坂　浩司**

先端産業創造プロジェクト・レポートの第４回は「ナノカーボン」を取り上げる。ナノカーボンは、軽量で熱や電気の伝導率が高いことから幅広い用途での活用が期待され、現在、官民を挙げてナノカーボン材料と製品化に取り組んでいる。本稿では、わが国のナノカーボン産業の概況を示し、次に本県のナノカーボンに関連する動向についてまとめる。最後に、今後の産業としての発展の課題について述べる。

夢の炭素物質“ナノカーボン”

ナノカーボンは炭素物質の総称で、直径がナノメートル（１nmは10億分の１m）と微細サイズの分子で、その形状や構造によって、カーボンナノチューブ（CNT）、グラフェン、フラーレンなどに分類（表１）されている。

1985年にフラーレンが発見されて以降、CNT、グラフェンなどの形態が順次、発見されてきた。ナノカーボンは高強度で軽量なことから航空・宇宙分野における構造部材への応用、熱や電気の伝導率が高いことから導電性材料、放熱材料として半導体や医療、生物分野への応用、また高速トランジスタへの応用（表２）などが期待されている。このような特性から幅広い産業分野への適応が期待されており、各物質の特性に応じて、種々の機能性材料としての応用展開、製品開発が進んでいく。

中でも我が国に最も馴染みがあり用途開発が期待されているのがカーボンナノチューブ（以下CNT）であろう。CNTは、日本人研究者が発見した炭素物質で鉄よりも軽くて強い素材である。「カーボン（Carbon）＝炭素」「ナノ（Nano）＝ナノメートル（nm）」「チューブ（tube）＝円筒」を掛け合わせた造語で、1991年に本県出身で名城大学の飯島澄男終身教授が発見したことで知られている。

CNTは単層と多層に分けられ、複数層のものを多層CNT、１層のものを単層CNTと呼ぶ。単層CNTは、重さがアルミニウムの約半分であるのに対して、強度は鉄の20倍、熱伝導率は銅の５倍以上あり、

■表１　ナノカーボン材料の種類と世界市場規模など

名称	発見年	2013年 市場規模	2030年 市場予測	記
カーボンナノチューブ	1991	32億円	600億円	
グラフェン	2004	13億円	1,000億円	2010年 ノーベル物理学賞受賞
フラーレン	1985	29億円	70億円	1996年 ノーベル化学賞受賞

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）資料などを元に当研究所で作成

多層CNTも熱伝導率が銅の10倍以上あることが分かっている。このようにCNTは熱伝導率が高い分、発熱量を抑えることができるため、例えば、高密度化によって熱をより多量に発する半導体の材料への適用が期待されている。

■表２　ナノカーボン材料の応用先と世界市場予測

応用先	2013 年 市場規模	2030 年 市場予測	適用が期待される ナノ炭素材料
自動車用ケーブル	24,500 億円	48,000 億円	ＣＮＴ
ＰＡＮ系炭素繊維	1,344 億円	3,200 億円	ＣＮＴ
ゴム・樹脂複合	580 億円	2,980 億円	ＣＮＴ
圧力センサー	2,928 億円	10,800 億円	グラフェン
透明導電性フィルム	994 億円	1,500 億円	グラフェン
ＲＦトランジスタ	14,600 億円	41,000 億円	ＣＮＴ・グラフェン
電気二重層キャパシタ	168 億円	2,000 億円	ＣＮＴ・グラフェン
ＬｉＢ負極材	480 億円	1,180 億円	ＣＮＴ・グラフェン

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）資料などを元に当研究所で作成

政府の取り組み

わが国では内閣府の総合科学技術会議が2006年３月に策定した「分野別推進戦略」で、科学技術の戦略的重点化として、「ライフサイエンス」、「情報通信」、「環境」、「ナノテクノロジー・材料」を重点推進４分野に決めた。その中でCNTのエレクトロニクス方面への応用が示された。その後、科学技術イノベーション立国を目指して、「科学技術イノベーション総合戦略2014」を閣議決定した。その中では、ナノテクノロジー・材料分野の研究について政策課題の解決を支える分野横断技術とし、産業競争力強化策を実現するためのコア技術としてナノカーボンをその１つに示した。

また、経済産業省の外郭組織である新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では1998年からCNTの実用化研究に着手し、この間、産業化への取り組みを進めてきている。また、2010年からはナノカーボン材料と既存の材料を組み合わせて新たな材料資源を開発する「低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト」をスタートしナノカーボンの実用化を推進している。一方、独立行政法人産業技術総合研究所は2015年４月にCNT産業の創出を目的に「ナノチューブ実用化研究センター」を設立した。これまでにCNT塗料の開発など研究成果を出している。

写真１　ナノカーボン素材（カーボンインク）を使った電子カイロ

■表３　埼玉県のナノカーボン先端技術交流会の開催日と参加企業、参加者数の推移

開催回	開催日	参加企業数 ／ 参加者数
第１回	2014 年４月 16 日	104 社 ／ 137 人
第２回	７月 18 日	49 社 ／ 65 人
第３回	10 月 23 日	52 社 ／ 64 人
第４回	2015 年２月９日	50 社 ／ 68 人
第５回	５月 11 日	71 社 ／ 116 人
第６回	９月１日	58 社 ／ 84 人
第７回	11 月 16 日	50 社 ／ 68 人
第８回	2016 年２月 15 日	61 社 ／ 91 人
第９回	９月 12 日	51 人
第 10回	11 月９日	38 人
第 11回	2017 年３月 24 日	25 人
第 12回	８月１日	54 人

埼玉県先端産業課資料に基づき作成

本県の取り組み

本県ではナノカーボンに関連する企業の県内集積を目指して、材料開発への助成制度やナノカーボン製品の実用化技術の開発を後押ししている。取り組みでは、県内の中小企業への技術指導や相談を受ける目的で、2014年４月、さいたま市中央区に「埼玉ナノカーボンセンター」を開設した。同センターは2015年５月に「先端産業支援センター埼玉」に集約され、現在３人のアドバイザーが相談対応に当たっている。

また、ナノカーボンに関する県内外の企業の情報交換の場として、2014年４月から「ナノカーボン先端技術交流会」を連続的に開催している。開催回数は2017年８月までに計12回に及び、参加者（表３）は累計で８６１人に及ぶ。開催当初と比較して参加者数が減少傾向にあるが、これは開催テーマに応じ

■表４　ナノカーボン新技術・製品化開発補助金　採択企業・テーマ一覧

	採択企業名	所在地	開発テーマ
平成29年度	礎電線 （株）	吉川市	モータ・コイル用カーボンナノチューブ（CNT）エナメル被覆電線の開発
	（株）樫の木製作所	越谷市	耐候性、耐熱性、省エネに優れた農・工業用 CNT フィルム・ヒーターの量産開発
	（株）ケー・エス・ティー	八潮市	接着剤機能を併せ持つナノファイバーフィルタ濾材の開発
	東レエンジニアリング （株）	東京都中央区	フラーレン被覆炭素繊維を用いた３D プリンタ用造形材の開発
	（株）都ローラー工業	川口市	Diamond-Like Carbon 薄膜の再コーティング技術の開発
平成28年度	サーパス工業 （株）	行田市	電子材料関連プロセス用帯電防止 CNT 添加フッ素樹脂加工製品の開発
	サイデン化学 （株）	さいたま市	超臨界ナノ粒子技術によるナノマテリアル化水系接着剤・塗料材料の開発
	（株）先端力学シミュレーション研究所	和光市	フラーレン分散型接着剤を活用した高耐久性 CFRP 接合技術開発
	ビタミン C60 バイオリサーチ（株）	川口市	フラーレンを用いた新規紫外線防御剤及び毛髪保護剤の製品開発
平成27年度	サイバーレーザー （株）	和光市	ナノカーボン非線形光変調器を搭載した超短パルスシーダー光源の製品化
	杉田電線 （株）	さいたま市	超軽量カーボンナノチューブ電線の巻取技術の工業化
	ナノサミット （株）	川口市	CNT（カーボンナノチューブ）透明導電インクの量産化技術開発
	FLOX（株）	和光市	高温多湿に対応した高安定性フラーレン分散型瞬間接着剤の開発
	（株）ユーテック	八潮市	フラーレンを原料としたプラズマ CVD 法によるカーボン超薄膜のコーティング技術及び装置開発

埼玉県先端産業課資料に基づき作成

て対象にバラつきがある事と、回数を重ねることで実際にナノカーボンをビジネスとして取り組みたい企業に収れんされてきたと考えられる。また県では、先端産業創造プロジェクトで定めた重点５ 分野に関わる新製品、新技術開発に取り組む企業に補助金を交付する事業を開始している。ナノカーボン分野では１件あたり2,000万円を上限に助成する事業を2015年から行い、これまでに14社（表４）が助成を受けているが、補助金を活用してすでに製品化の開発に目途を付けた事例も出てきている。その他には、新素材の開発を目的として１社あたり50万円（2017年度は100万円）の補助金を設定している。

次に県内企業の取組み事例として採択企業の事例を紹介する。

写真２ 「nanotech2018」に出展

■杉田電線株式会社（さいたま市岩槻区）
－ 平成27年度採択企業 －

杉田電線株式会社は、2018年に創業65年を迎える電線メーカーだが、2015年に新規事業としてCNTの開発に着手した。同年春に、埼玉県産業振興公社の紹介で信州大学の鶴岡秀志教授の紹介を受けて岡山大学との共同研究を開始した。同社は長年の電線生産から、CNTに応用できる技術の蓄積はあったものの、電線とCNTでは基本的な製造技術が異なり、杉田社長は研究開始を決めるまで何度も岡山大学に足を運んだ。また、社内にたまたま大学時代にCNTを研究した社員がいたことも研究を後押しした。

共同研究は、鶴岡教授をはじめ、岡山大学の林靖彦教授、東京工業大学の松本英俊准教授の３人と杉田電線でチームワークを組み、岡山大学の垂直成長したCNTからの乾式紡績技術を導入して、合成から紡績まで一貫して高純度で均質なCNTヤーン（糸）を製造することを目的に行った。研究では、シリコン基板上に芝生のように垂直成長したCNTをヤーンにして紡ぎだすもので、同社が長年築いてきた電線製造技術を応用して行う。協力会社と共にCNT合成装置とプロセス開発を行い、国や県の補助金も活用して約３年間をかけて試作品の開発及びCNT量産技術の開発に成功した。これにより同社は事業の本格化を目指して、CNTの量産設備を導入していく。

同社の技術は、他社が扱っていない高純度２層CNT合成方式を採用している。金属不純物が検出限界以下でCNTの直径と長さが揃っている高純度CNTを安価に製造する技術だが、1,000メートル以上のヤーンを巻き取ることができる世界初の長尺CNTヤーンの紡績を可能にしている。ヤーンの直径は平均35マイクロメートル（１マイクロは100万分の１メートル）で、銅と比較して90％以上の軽量化が可能で、プレス加工で使えるCNTクロスなど自動車関連の部品材料への

利用も期待される。杉田電線では実用化第１弾として、伸縮繊維と一緒にCNTヤーンを織り込んでテープ状にした「スギクロセンサーテープ（SS-T01）」を開発した。軽量で柔軟な形状にできることから高速応答センサーへの利用が期待されている。すでにサンプル出荷を進めていて、量産化に弾みをつけたい。

CNTヤーンは導電性や応答性が高く、センサーとして円滑な動作を実現することができるのが特徴で、今後のビジネスとしては、ロボットハンドに搭載する高精度な触覚センサー、人工筋肉などへの利用も想定する。軽量化ニーズが高い自動車用ワイヤハーネス（組み電線）への応用も可能だ。例えば人工筋肉への応用では、今後、市場の拡大が見込まれるヒト型ロボットの表情を容易に作れるようになる。同社には国内に加えて海外からの問い合わせ、引き合いも寄せられており、量産体制が整い次第、生産に着手する考えだ。

同社にとっては全くの新しいCNTビジネスとなるが、杉田社長は「CNTの用途は無限大。今後、私たちが予期していない応用商品をお客様が開発してくれることもあるだろう。その時、私たちはお客様のニーズにあった商品を提供していきたい。」と強調する。

写真３　ナノサミット株式会社が開発した「洗える導電性繊維と布」

■ナノサミット株式会社（川口市）
－平成27年度採択企業－

ナノサミット株式会社は、CNT、ナノセルロースなどのナノ材料の実用化開発を目指す目的で2009年10月に北海道大学のインキュベーションセンターで会社を立ち上げた。同社は、北大でナノ材料の研究に取り組んでいた古月文志教授（現・東京大学特任教授）が開発したCNTの分散を安価で大量に生産する技術に着目、北大が所有する特許を活用してCNTの粉末を液体の中で分散化させて金属に替わる導電性インクの開発に取り組んでいる。

この技術はCNTの表面処理技術が基礎になっている。炭素の糸が分散化した際、絡み合わず均一にほぐすのが特徴で、導電性インクの量産化が確立されれば、既存の印刷技術を使って低コストで様々なモノにインクを塗布できるようになる。CNTインクは様々な用途に利用できる機能を有しており、例えば、樹脂に混ぜて使えば、強度を増すことができ、導電性も帯びることから新素材の樹脂を作り出すことができる。

同社は北大の特許を元に独自に実験を繰り返す中、埼玉県が先端産業を支援する動きを知り、埼玉県産業技術総合センター（SAITEC）内の研究室に本社を移した。当

時、わが国では単層のＣＮＴについて分散技術が確立されていなかったことに着目し、同社は2015年に県に補助金申請を行い、試験レベルで分散技術の量産化を確立するための設備をSAITECに導入した。これにより同社は、2016年２月末までに量産化に目途をつけた。

同社は現在、導電性インクを素材にしたアプリケーションの開発に力を入れている。その１つが、導電性のある糸（ヤーン）の開発だ。東京大学の坂田一郎教授研究室との共同研究で、CNTを糸に練り込んだ「洗える導電性繊維」を2017年に開発に成功した。この繊維を使って洋服などを編めば、心拍など人間の体調を意識せずにバイタルセンサーを通じて測定することが可能になる。近年、バイタルセンサーは手首で脈拍を計測する腕時計タイプの製品が普及しているが、心臓に近い場所で、身に着けていることを気にせずにより正確に測定できるメリットが得られる。導電性のある繊維は、糸の中にCNTを練り込んでいるため、糸そのものが導電性を持ち、洗濯しても物質の機能が劣化しにくい。

また2017年12月、この導電性のインクを利用した初の一般消費者向け商品として、電子カイロ「スピードウォーマー」がTMN　LUCIA（越谷市）から発売された。CNTインクを樫の木製作所（越谷市）に依頼して薄いフィルム上にコーティング加工した素材で開発されたもので、モバイルバッテリーからUSB経由で電源を取り、くり返し利用できる電子カイロだ。使い捨てカイロに比べて20倍以上の早さで温まる。さらにはNEDOのプロジェクトに参画したミズノ株式会社に協力する形で、CNTの表面処理技術を提供、現在、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）と複合化したゴルフクラブの製品化を目指している。

ナノサミットは今後も継続的に事業が成長すると判断、2019年中には県内外を念頭に別の場所に生産拠点を作る方向で検討している。

■株式会社樫の木製作所（越谷市）
－平成29年度採択企業－

株式会社樫の木製作所は国内外の電線会社を主要な取引先とする企業で、高度情報化社会に必要な超高周波電送ケーブルなどの素材を開発している。

情報化社会が進展していく中で、線材に求められるニーズは、より多くの情報を、より早く信号処理することだが、大隈浩社長は「材料と高速伝達をうまくマッチングさせることにより、ロスなく長距離にデジタル信号を電送する材料の開発が求められている」と説明する。

昨今はケーブルを「より細く、小さく、軽量化」と云う信号電送特性の確保には相反する特性ニーズであり、ケーブル素材・材料へより高度な特性を要求されている。

同社がナノカーボンビジネスに参入したのは2016年夏だが、契機となったのは株式会社ナノサミットから、ポリエルテルフィルムにカーボンナノチューブ（CNT）インクを塗布する話が寄せられたことだ。当初、注文の話を聞いた時点では、CNTビジネスについて大隈社長は「全く興味はなかった」と話すが、最終的にCNT、グラフェンの分散化技術及びコーティング技術の確立により導電性の高いCNTフィルムの製造が可能となり、電気抵抗を減らすことで情報伝達のロスを減らせると考えた。イメージしたのは「超電導」だ。電気抵抗は、流れている電流エネルギーが熱になり逃げることでエネルギーの損失を発生させてしまうが、超電導は熱の発生もエネルギーロスも起きないとされている。
理論上は抵抗値がゼロになるとされるが、同

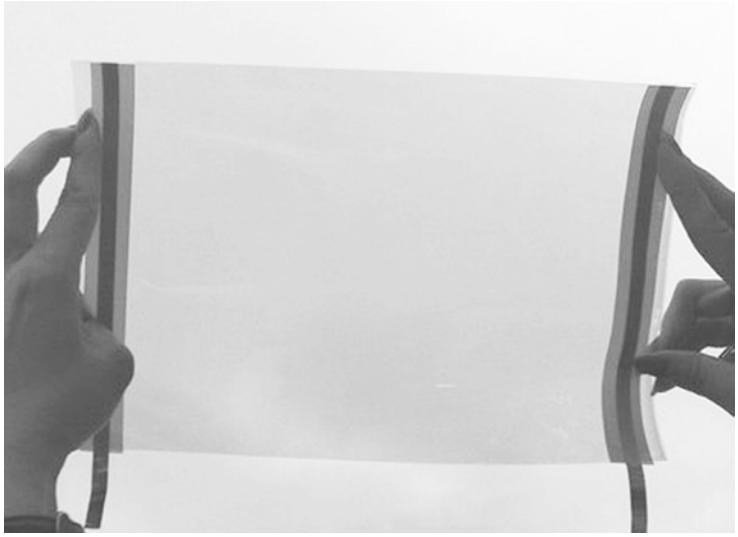

写真４　株式会社樫の木製作所が開発した「透明ヒーター」

社はこの画期的なCNTフィルムでその実現を目指している。

2017年にナノサミットから単層、多層のCNTに関する分散液の技術を導入し、同年、小規模な研究室を工場内に建てた。それにより分散液の量産が可能になった。同年11月には、半導体型CNTと金属型CNTを分離する技術を茨城県内の企業から独占使用権を購入して試作プラントを作った。１枚単位のグラフェンと金属型CNTを均一分散し、特殊コーティング加工することで、超低抵抗CNTフィルムの量産を目指している。

現在までに開発したフィルムの中には最小幅0.6ミリメートル、厚さ2.5マイクロメートル（１マイクロは100万分の１メートル）と云うものも有り、糸の様に巻いてテープ状に加工させる特殊な技術も有る。

樫の木製作所はCNTフィルムの開発では、自社で最終製品を作る計画はなく、あくまでも中間材としての材料開発に特化して進めていく考えを持っている。当面の計画では、投資額２億円をかけて越谷市内に新工場を建設、2018年秋から単層・多層CNT及びグラフェンの分散液、更には単層CNTの半導体型CNTと金属型CNTへの分離、そしてそれらをフィルムへコーティングするCNT関連の本格的な量産を目指している。さらには、今後の増産体制を念頭にさらに大規模の生産拠点を作るための用地獲得を県内外で目指している。

今後の課題とまとめ

ナノカーボンは高強度、軽量、導電率の高さという優れた材料特性から夢の新素材として官民を挙げて産業化への取り組みが進められてきた。近年ではその機能性を生かした用途開発も広がりを見せ始めている。今後は、本格的な製品開発、量産へと期待が膨らむが、ビジネスの収益性や製品信頼性の視点から、どのような分野が継続的な成長市場となるのか、判明にはさらに時間を要するかもしれない。

本県においても、ナノカーボンの将来性に着眼して、研究、開発に取り組み始める企業が出始めているが、そのほとんどの企業が中堅・中小、ベンチャー企業である。

ナノカーボンの利用途としては、半導体材料や電線素材、航空機部品の素材などが既に活用され、その効果は認められれているが、いずれも市場規模が大きい分、求められる投資額も大きくなり、中堅・中小企業の市場参入は容易ではない。そのため、中堅・中小企業はナノカーボン自体の素材特性の強みを生かした付加価値の高い原料開発など、より市場の川上で独自色を出すことや、マーケティングの視点を持ちながら、コンシューマー向けにこれまでにないオリジナリティの高い製品開発の探索も面白いかもしれない。県が主催するナノカーボン先端技術交流会などを積極的に利用するなどしてビジネス機会の拡大が求められる。